青脚麻肉鸡对不同来源玉米的代谢能值及近红外预测模型的构建

赵　佳　丁雪梅　王建萍　罗玉衡　宿卓薇　白世平　曾秋凤　张克英*[1]

（四川农业大学动物营养研究所，农业部动物抗病营养与饲料重点实验室，雅安　625014）

摘　要：本试验旨在评定青脚麻肉鸡对 30 个不同来源玉米的代谢能值，并利用近红外光谱技术构建代谢能值的预测模型，为构建青脚麻肉鸡饲料营养价值数据库和玉米代谢能值的快速预测积累基础数据。试验采用单因素完全随机设计，选用 48 只体重为（4.030±0.392） kg 的 30 周龄青脚麻肉公鸡，按照组间体重无差异原则随机分组，做 9 批次代谢试验，每批做 3 或 4 个玉米样，每样设 8 个重复，每个重复 1 只鸡；每批做 1 个内源组，每批之间设 10 d 恢复期。试验采用排空强饲法测定代谢能值，试鸡饥饿 48 h，然后按体重 2%强饲待测饲料，收集排泄物 48 h；内源组鸡饥饿 48 h，再继续饥饿收集排泄物 48 h。结果显示：1）30 个玉米样品的干物质为（86.75±0.55）%（85.55%~87.79%），以干物质为基础，粗蛋白质为（9.21±0.52）%（8.27%~10.58%），总能为（18.716±0.106） MJ/kg（18.429~18.951 MJ/kg），中性洗涤纤维为（13.00±2.21）%（10.00%~18.52%），酸性洗涤纤维为（3.23±0.46）%（2.37%~4.36%），粗纤维为（2.28±0.28）%（1.89%~2.76%）。2）以干物质为基础，青脚麻肉鸡对 30 种玉米的表观代谢能（AME）为（14.627±0.655） MJ/kg（11.727~16.225 MJ/kg），氮校正表观代谢能（AMEn）为（14.672±0.641） MJ/kg（11.793~16.248 MJ/kg），真代谢能（TME）为（16.248±0.619） MJ/kg（13.333~17.727 MJ/kg），氮校正真代谢能（TMEn）为（16.293±0.605） MJ/kg（13.398~17.750 MJ/kg）。3）用近红外技术建立的青脚麻肉鸡 AME、AMEn、TME、TMEn 校正决定系数（R^2_{cal}）、校正标准差（RMSEE）及 RSD 分别为：0.99、0.035、0.24，0.99、0.029、0.20，0.99、0.031、0.19，0.99、0.030、0.18；交叉验证决定细数（R^2_{cv}）、交叉验证标准差（RMSECV）及相对标准差（RSD）分别为 0.92、0.117、0.80，0.93、0.106、0.73，0.90、0.113、0.70；0.91、0.108、0.66。结果表明：1）青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 存

收稿日期：2016–05–03

基金项目：四川省肉鸡产业链项目-肉鸡现代产业链关键技术集成研究与产业化示范（2012NZ0037/2016）资助

作者简介：赵　佳（1988－），女，四川南充人，硕士研究生，从事家禽营养研究。E-mail: jiazhao720@163.com

*通信作者：张克英，教授，博士生导师，E-mail: zkeying@sicau.edu.cn

在差异；2）近红外模型可以较好地预测青脚麻肉鸡的玉米代谢能值。

关键词：青脚麻肉鸡；玉米；代谢能；近红外模型

中图分类号：S816.2

众所周知，家禽具有为能而食的特性，饲粮能量水平影响采食量，饲料有效能值是制定家禽饲养标准及设计饲粮配方的重要技术参数[1]。因此，只有准确评定饲料能值，才能精准配制饲粮，满足家禽的营养需要，发挥生产潜力，节约饲料成本[2]。玉米是肉鸡饲粮的主要能量饲料，占饲粮 50%~70%。全国各地由于环境条件和玉米品种的差异，造成玉米理化品质的不同而引起代谢能的变异[3]。青脚麻肉鸡作为四川优质肉鸡，肉味独特，肉质鲜、香、嫩、滑，深受广大消费者欢迎。本课题组已开展了青脚麻肉鸡营养需要的系列研究，确定了饲粮的适宜能量、粗蛋白质（CP）、赖氨酸和维生素水平，但尚缺乏对饲料能量价值的评定研究。利用近红外光谱技术(near infrared reflectance spectroscopy,NIRS)分析样品具有方便、快速、高效、准确和成本较低，不破坏样品，不消耗化学试剂，不污染环境等优点，因此该技术受到越来越多人的青睐。Owens 等[4]对小麦总能（GE）进行了 NIRS 定标，近红外预测值和实测值的相关系数为 0.86；申攀[5]在 0~3 周龄黄羽肉鸡上对玉米代谢能进行了 NIRS 定标。这些研究显示，NIRS 用于单一饲料原料的代谢能预测具有极大潜力。但是，目前尚无关于青脚麻肉鸡的玉米代谢能值评定及近红外预测模型建立的报道。为此，本研究以国内 30 个玉米为材料，评定青脚麻肉鸡对其的代谢能，同时探索 NIRS 预测青脚麻肉鸡对玉米代谢能的可行性，为合理配制青脚麻肉鸡饲料提供技术支持，为推动优质肉鸡产业链的发展提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验设计及方法

本试验用玉米样品 30 个，来自黑龙江、山东、河北、吉林和四川等地，通过当地的饲料公司或者农户收集。

本试验用 30 周龄青脚麻肉鸡肉公鸡，采用真代谢能（TME）法评定其对玉米的代谢能。试验共选取健康青脚麻肉鸡 48 只，按照组间体重无差异原则随机分组，做 9 批次代谢试验，每批做 3 或 4 个玉米样，每样设 8 个重复，每个重复 1 只鸡；每批做 1 个内源组，每批之间设 10 d 恢复期。试验开始前在泄殖腔周围缝合塑料瓶盖以便收集排泄物。

Sibbald 等[6]在 2.5 kg 左右的单冠白色来航公鸡上的代谢试验发现，强饲量增加到 50 g 时，表观代谢能（AME）、氮校正表观代谢能（AMEn）、TME 和氮校正真代谢能（TMEn）值标准差逐渐变小，趋于稳定。国家标准（GB/T 26437—2010）规定体重为 2.5 kg 左右的肉公鸡，强饲量为 60 g[7]，占体重的 2.4%。本文所用试验鸡只体重组内差异较大，因此按体重的 2%强

饲。试鸡饥饿 48 h，然后按体重 2%强饲待测饲料，收集排泄物 48 h；内源组鸡饥饿 48 h，继续饥饿，收集排泄物 48 h。每批代谢试验结束后，所有鸡均饲喂恢复期饲粮，以恢复体况。

1.2 恢复期试验饲粮

本试验采用单一玉米原料，玉米粉碎后，补充适量矿物质、维生素和食盐。

1.3 动物饲养管理

试验在四川农业大学动物营养研究所教学科研试验基地代谢舍进行，单笼饲养于代谢笼（0.50 m×0.42 m×0.55 m）中，自由采食，自由饮水，每天 24 h 光照，通过开启门窗通风以保证室内空气清洁。日常管理按照常规饲养管理程序进行。

1.4 考察指标

1.4.1 样品收集处理

1.4.1.1 饲料样品的采集 每次试验前，待饲料样粉碎后立即从每个处理取样约 200 g，装于样品袋中，标明玉米编号及试验日期，－20 ℃储存待用。

1.4.1.2 粪样的收集 排泄物的收集技术参照 GB/T 26437—2010 的方法[7]进行，收集的粪样立即冻于－20 ℃冰箱，待完成 48 h 的收集期后，将全部粪样解冻经 65 ℃干燥，粉碎过 40 目筛，储存于－20 ℃，待测。

1.4.2 测定指标及方法

饲料中水分、CP、能量、中性洗涤纤维（NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）和粗纤维（CF）以及排泄物中 CP 和能量的测定参照张丽英[8]。

AME=（GE 采食量－粪中能量）/干物质（DM）采食量；

AMEn=TME－34.39×（摄入氮－排泄氮）；

TME=（GE 采食量－粪中能量+内源能）/DM 采食量；

TMEn=TME－34.39×（摄入氮－排泄氮）。

1.5 玉米代谢能近红外光谱预测模型的构建

近红外光谱的扫描仪器工作参数设定为：谱区范围 12 000~4 000 cm^{-1}（800~2 500 nm）；扫描次数 64 次；分辨率 8 cm^{-1}。室内扫描温度 25 ℃，每个样品重复装样 3 次进行扫描。

从 30 个样品中随机选择 5 个作为外部验证集，其余 25 个作为校正集。采用 BRUKER 公司 OPUS/QUENTS 5.5 商用光谱定量分析软件对玉米原始光谱进行处理，采用偏最小二乘回归建立校正模型，运用交互留一验证对模型的预测效果进行评定。以交叉验证标准差（RMSECV）为指标，确定最佳主成分维数、光谱区间和光谱预处理方法，建立校正模型。

1.6 数据统计与分析

先用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析，比较青脚麻肉鸡对不同来源玉米代谢能值的差异；再进行玉米常规成分与代谢能的相关回归分析。平均数差异显著时，再用 Duncan 氏法进行多重比较，以 $P<0.05$ 为差异显著水平，结果以平均值±标准差表示。同时，分别对 AME、AMEn、TME 和 TMEn 实测值与近红外预测值进行配对 t 检验。

2　结　果

2.1　玉米常规营养成分

经测定，试验 30 个玉米样品的 DM 为（86.75±0.55）%（85.55%~87.79%）。以 DM 为基础，从表 1 可以看出，30 个玉米样品的 CP 为（9.21±0.52）%（8.27%~10.58%），GE 为（18.716±0.106） MJ/kg（18.429~18.951 MJ/kg），NDF 为（13.00±2.21）%（10.00%~18.52%），ADF 为（3.23±0.46）%（2.37%~4.36%），CF 为（2.28±0.28）%（1.89%~2.76%）。

表 1　玉米常规营养成分含量（干物质基础）

Table 1　Conventional nutrient contents in corn (DM basis)　　　%

样　　品 Samples	产地 Producing area	粗蛋白质 CP	总能 GE/(MJ/kg）	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	粗纤维 CF
1	黑龙江	8.45	18.689	17.13	3.80	2.76
2	黑龙江	9.81	18.712	14.99	4.36	2.73
3	黑龙江	9.99	18.872	11.91	3.69	2.31
4	黑龙江	9.42	18.677	14.25	2.63	2.46
5	黑龙江	8.79	18.788	12.16	4.14	2.38
6	齐齐哈尔	8.47	18.755	11.83	3.41	2.25
7	农场第 1 批	9.09	18.666	10.23	2.85	1.91
8	农场第 2 批	9.03	18.644	12.13	3.01	2.16
9	吉林	9.20	18.661	10.58	2.60	2.11
10	吉林	9.30	18.637	11.02	3.17	2.74
11	吉林	9.45	18.680	12.23	3.26	2.04
12	吉林	9.34	18.730	11.86	3.42	2.66
13	陕西	9.18	18.789	10.00	2.37	2.34
14	河南泌阳	9.40	18.664	13.09	3.14	2.20
15	山东聊城	8.79	18.759	12.85	3.20	2.14

16	河北保定	8.79	18.822	12.60	2.50	2.36
17	河北南河	8.27	18.728	15.30	3.54	1.99
18	河北临县	9.20	18.771	10.58	2.79	1.95
19	新疆	9.37	18.569	12.76	3.54	2.27
20	新疆石河子	9.70	18.869	12.10	3.02	1.95
21	甘肃民勤	9.28	18.685	12.54	3.22	2.71
22	甘肃酒泉	9.03	18.795	11.75	3.11	2.12
23	宁夏固原	9.41	18.506	11.09	2.79	1.90
24	宁夏	8.50	18.683	12.74	3.62	2.14
25	四川乐山	9.98	18.739	16.05	3.16	2.21
26	四川绵阳	10.58	18.951	15.55	3.28	2.59
27	四川成都	8.37	18.786	10.92	3.15	1.89
28	四川内江	9.37	18.425	18.52	3.67	2.58
29	四川雅安	9.53	18.772	17.14	3.01	2.10
30	云南	9.31	18.661	14.10	3.46	2.55
平均值 Mean		9.21	18.716	13.00	3.23	2.28
变异系数 CV/%		5.65	0.565	17.00	14.14	12.13

2.2　青脚麻肉鸡的体重、氮沉积量和内源能排泄量

从表 2 和表 3 可以看出，试鸡平均体重为（4.030±0.392） kg（3.184~4.935 kg），氮沉积量为(－1.084±0.508) g（－2.941~－0.100 g），内源能排泄量为(27.32±6.81) kJ/kg BW（15.22~41.55 kJ/kg BW）。各处理间试鸡体重差异不显著（*P*>0.05）、氮沉积量差异显著(*P*<0.05)；不同代谢批次的试鸡内源能排泄量差异不显著（*P*>0.05）。

表 2　青脚麻肉鸡的体重和氮沉积量

Table 2　Body weight and retained nitrogen of *Qingjiaoma* broilers

样品 Samples	体重 Body weight/kg	氮沉积量 Retained nitrogen/g
1	3.765±0.285	－1.306±0.687[abc]
2	3.822±0.378	－1.255±0.609[abc]
3	3.887±0.336	－1.051±0.306[bcde]
4	4.155±0.454	－0.974±0.406[bcde]

5	4.154±0.396	－0.881±0.558[bcde]
6	4.161±0.396	－0.780±0.333[cde]
7	4.154±0.343	－0.934±0.255[bcde]
8	4.215±0.480	－0.856±0.412[bcde]
9	3.830±0.341	－1.171±0.328[abcd]
10	3.866±0.297	－1.173±0.358[abcd]
11	3.919±0.398	－1.648±0.668[a]
12	3.944±0.297	－1.023±0.548[abcd]
13	3.918±0.475	－1.247±0.615[abc]
14	3.997±0.421	－1.678±0.575[a]
15	4.259±0.408	－1.041±0.310[bcde]
16	3.819±0.375	－1.053±0.631[abcd]
17	4.162±0.412	－0.848±0.406[bcde]
18	4.161±0.460	－0.919±0.340[bcde]
19	3.874±0.368	－1.380±0.533[ab]
20	4.216±0.480	－0.637±0.366[de]
21	3.999±0.431	－1.359±0.449[abc]
22	3.997±0.387	－1.131±0.309[abcde]
23	4.100±0.308	－0.916±0.269[bcde]
24	4.188±0.369	－1.306±0.481[abc]
25	3.831±0.332	－1.315±0.525[abc]
26	3.918±0.370	－1.237±0.767[abc]
27	4.019±0.307	－1.278±0.394[abc]
28	4.273±0.356	－0.986±0.272[bcde]
29	4.216±0.398	－0.564±0.174[e]
30	4.018±0.375	－0.808±0.493[bcde]
平均值 Mean	4.030±0.392	－1.084±0.508
P 值 *P*-value	0.256	<0.001

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），相同字母表示差异不显著（$P>0.05$）。表 3、表 4 同。

Values in the same column with different small letter superscripts mean significant differences （$P<0.05$），

while with the same letter superscript mean no significant differences （P>0.05）. The same as Table 3 and Table 4.

表 3　青脚麻肉鸡的内源能排泄量

Table 3　Endogenous energy losses of *Qingjiaoma* broilers　　（kJ/kg BW）

批次 Batches	内源能排泄量 EEL
1	32.65±5.87
2	26.65±6.99
3	26.32±5.22
4	27.52±6.76
5	25.32±5.87
6	27.41±7.32
7	29.22±8.00
8	28.39±8.49
9	22.36±4.22
平均值 Mean	27.32±6.81
P 值 *P*-value	0.202

2.3　青脚麻肉鸡对不同来源玉米的代谢能

从表 4 可以看出，以 DM 为基础，青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME 为（14.627±0.655）MJ/kg（11.727~16.225 MJ/kg），AMEn 为（14.672±0.641） MJ/kg（11.793~16.248 MJ/kg），TME 为（16.248±0.619） MJ/kg（13.333~17.727 MJ/kg），TMEn 为（16.293±0.605） MJ/kg（13.398~17.750 MJ/kg）。不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 存在显著差异（P<0.05）。

通过回归分析（表 5），青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 4 种代谢能与 DM 呈正相关。以 DM 为基础，4 种代谢能与 CP、NDF、ADF 和 CF 呈负相关，AME 和 AMEn 与 GE 呈正相关，TME 和 TMEn 与 GE 呈负相关。其中，AME 和 AMEn 与 CF 呈强负相关的趋势，但未达显著水平（P 值分别为 0.066 和 0.064）；TME 和 TMEn 与 CP 呈显著负相关（P 值分别为 0.040 和 0.036）；其余相关性均不强（P>0.10）。

表 4　青脚麻肉鸡对不同来源玉米的代谢能（干物质基础）

Table 4　Metabolizable energy of different corns for of *Qingjiaoma* broilers （DM basis）　　MJ/kg

样　品 Samples	表观代谢能 AME	氮校正表观代谢能 AMEn	真代谢能 TME	氮校正真代谢能 TMEn

1	14.003±0.706^{abc}	14.055±0.708^{abc}	15.921±0.706^{abc}	15.974±0.708^{abc}
2	14.306±0.596^{bcde}	14.357±0.573^{bcdef}	15.903±0.596^{abc}	15.954±0.573^{abc}
3	14.551±0.462^{cdefgh}	14.594±0.459^{cdefghi}	16.146±0.462^{bcdefg}	16.164±0.459^{bcdefg}
4	14.821±0.290^{defghijk}	14.861±0.276^{efghijkl}	16.503±0.290^{cdefghi}	16.542±0.276^{cdefghi}
5	14.925±0.520^{efghijk}	14.961±0.501^{fghijk}	16.597±0.520^{defghi}	16.632±0.501^{defghi}
6	15.005±0.302^{fghijk}	15.036±0.296^{fghijk}	16.727±0.302^{fghi}	16.758±0.296^{fghi}
7	15.030±0.275^{fghijk}	15.067±0.277^{fghijk}	16.689±0.275^{fghi}	16.726±0.277^{fghi}
8	15.372±0.238^{jk}	15.401±0.236^{kl}	16.677±0.238^{fghi}	16.706±0.236^{fghi}
9	14.407±0.341^{bcdef}	14.453±0.329^{bcdefg}	16.320±0.341^{cdefghi}	16.367±0.329^{cdefghi}
10	14.196±0.375^{abcd}	14.244±0.364^{abcde}	16.137±0.375^{bcdefg}	16.185±0.364^{bcdefg}
11	14.051±0.929^{abc}	14.117±0.912^{abcd}	15.605±0.929^{ab}	15.671±0.912^{ab}
12	14.564±0.564^{cdefgh}	14.612±0.556^{cdefghi}	16.180±0.564^{bcdefgh}	16.228±0.556^{bcdefgh}
13	14.789±0.325^{defghij}	14.839±0.321^{efghijk}	16.347±0.325^{cdefghi}	16.397±0.321^{cdefghi}
14	14.286±0.521^{bcde}	14.354±0.501^{bcdef}	15.847±0.521^{abc}	15.915±0.501^{abc}
15	14.695±0.410^{defghi}	14.737±0.403^{defghij}	16.329±0.410^{cdefghi}	16.371±0.403^{cdefghi}
16	14.432±0.600^{bcdef}	14.480±0.590^{bcdefg}	16.009±0.600^{abcde}	16.057±0.590^{abcde}
17	15.042±0.303^{fghijk}	15.077±0.293^{fghijk}	16.774±0.303^{ghi}	16.808±0.293^{ghi}
18	15.079±0.453^{ghijk}	15.116±0.443^{ghijk}	16.800±0.453^{hi}	16.837±0.443^{hi}
19	13.843±1.526^{ab}	13.918±1.484^{ab}	15.448±1.526^{a}	15.524±1.484^{a}
20	14.695±0.376^{defghi}	14.720±0.368^{defghij}	15.985±0.376^{abcd}	16.011±0.368^{abcd}
21	14.291±0.476^{bcde}	14.346±0.469^{bcdef}	15.908±0.476^{abc}	15.963±0.469^{abc}
22	14.424±0.197^{bcdef}	14.469±0.189^{bcdefg}	16.025±0.197^{abcde}	16.070±0.189^{abcde}
23	15.149±0.160^{hijk}	15.186±0.155^{ijkl}	16.646±0.160^{efghi}	16.683±0.155^{efghi}
24	14.482±0.385^{cdefg}	14.534±0.372^{bcdefgh}	16.102±0.385^{bcdef}	16.154±0.372^{bcdef}
25	13.616±0.578^{a}	13.687±0.585^{a}	15.558±0.578^{ab}	15.629±0.585^{ab}
26	14.357±0.376^{bcde}	14.407±0.382^{bcdef}	15.937±0.376^{abc}	15.987±0.382^{abc}
27	14.827±0.359^{defghijk}	14.878±0.345^{fghijkl}	16.301±0.359^{cdefghi}	16.352±0.345^{cdefghi}
28	14.636±0.163^{cdefgh}	14.675±0.154^{cdefghi}	16.268±0.163^{cdefgh}	16.307±0.154^{cdefgh}

29	15.308±0.171[ijk]	15.330±0.167[jkl]	16.458±0.499[cdefghi]	16.481±0.494[cdefghi]
30	15.423±0.543[k]	15.456±0.529[l]	16.926±0.543[i]	16.958±0.529[i]
平均值 Mean	14.627±0.655	14.672±0.641	16.248±0.619	16.293±0.605
变异系数 CV/%	4.48	4.37	3.81	3.71
P 值 *P*-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

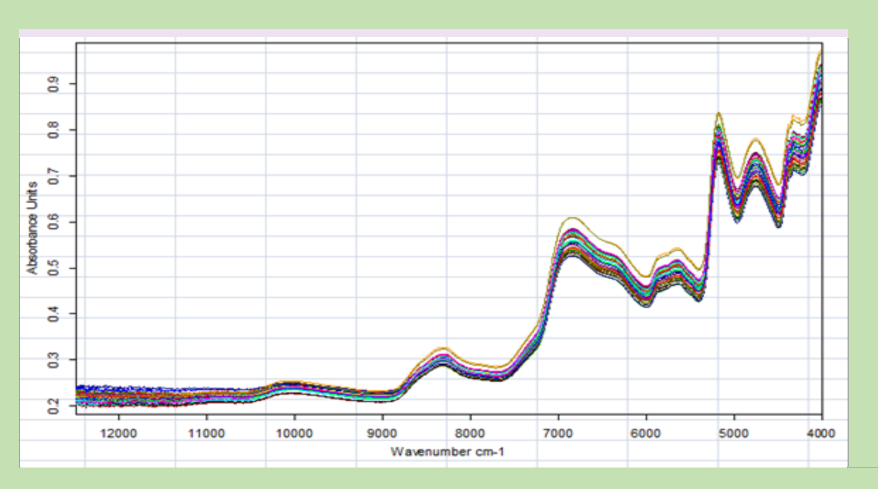
表 5　不同来源玉米代谢能与常规营养成分的相关系数（干物质基础）

Table 5　Correlation coefficients between metabolizable energy and conventional nutrient of different corns (DM basis)

营养成分 Nutrients	表观代谢能 AME	氮校正表观代谢能 AMEn	真代谢能 TME	氮校正真代谢能 TMEn
干物质 DM	0.222	0.223	0.127	0.130
粗蛋白质 CP	－0.265	－0.266	－0.377	－0.384
总能 GE	0.004	0.000	－0.062	－0.072
中性洗涤纤维 NDF	－0.169	－0.173	－0.198	－0.202
酸性洗涤纤维 ADF	－0.199	－0.201	－0.176	－0.180
粗纤维 CF	－0.340	－0.343	－0.251	－0.252

2.4　AME、AMEn、TME 和 TMEn 近红外模型构建

30 个玉米的近红外光谱如图 1，横坐标为谱区范围(cm^{-1})，纵坐标为反射吸光度(lgR^{-1})。在 12 000～4 000 cm^{-1} 的谱区范围内，30 个玉米样品表现出相同的光谱吸收趋势，但在每个波长点的吸收峰不同。



批注 [YT1]: 横坐标"谱区范围 Range of wave number/cm-1"
纵坐标"反射吸光度 Reflection absorbance/lgR-1"

图 1 玉米的近红外反射光谱

Fig.1 The near infrared reflectance spectrum of corn

采用软件的自动优化，选取最优优化条件，确定最佳的优化的谱区、光谱预处理方法及主成份维数（表 6）。采用软件自带的偏最小二乘回归建立校正模型，同时运用交互留一验证，结合表 6 中的建模条件，构建出青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 近红外模型（表 7）。

表 6 青脚麻肉鸡对不同来源玉米代谢能的建模条件

Table 6 Conditions of NIRS models for establishing metabolizable energy of corn for *Qingjiaoma* broilers

项目 Items	优化的谱区 Optimal range of wave number/cm^{-1}	光谱预处理方法 Spectral data preprocessing methods	主成份维数 Ranks
表观代谢能 AME	5 774.1~5 446.2	矢量归一化	9
氮校正表观代谢能 AMEn	5 774.1~5 446.3	矢量归一化	9
真代谢能 TME	6 101.9~5 446.2	矢量归一化	9
氮校正真代谢能 TMEn	6 101.9~5 446.3	矢量归一化	9

表 7 青脚麻肉鸡代谢能近红外模型参数

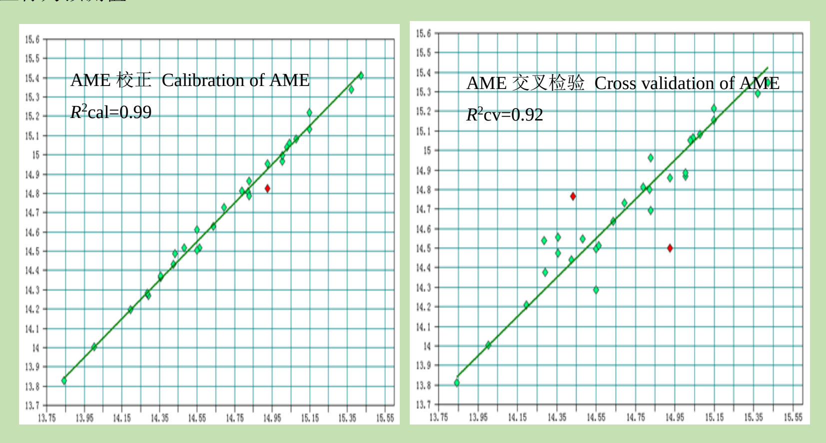
Table 7 NIRS model parameters of metabolizable energy of corn for *Qingjiaoma* broilers

项目 Items	样品数 Sample number	校正 Calibration			交叉检验 Cross validation		
		校正决定系数 R^2_{cal}	校正标准差 RMSEE	相对标准差 RSD	交叉验证决定系数	交叉验证标准差	相对标准差

					R^2_{cv}	RMSECV	RSD
表观代谢能 AME	25	0.99	0.035	0.24	0.92	0.117	0.80
氮校正表观代谢能 AMEn	25	0.99	0.029	0.20	0.93	0.106	0.73
真代谢能 TME	25	0.99	0.031	0.19	0.90	0.113	0.70
氮校正真代谢能 TMEn	25	0.99	0.030	0.18	0.91	0.108	0.66

从表 7 可以看出，青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 的校正决定系数（R^2_{cal}）均为 0.99，校正标准差（RMSEE）均在 0.030 左右，校正相对标准差（RSD）在 0.20 左右；交叉验证决定系数（R^2_{cv}）均在 0.90 以上，RMSECV 在 0.110 左右，交叉验证 RSD 在 0.70 左右。分别对 AME、AMEn、TME、TMEn 实测值与近红外预测值进行配对 *t* 检验，结果均未达到显著水平（P>0.05），说明预测值与实测值差异不显著，所构建模型可以用于玉米 AME、AMEn、TME 和 TMEn 的快速检测。

通过近红外光谱仪，导入代谢能实测值，采用一元线性回归，得到青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 实测值与预测值的关系如图 2 所示（横坐标为实测值，纵坐标为预测值）。



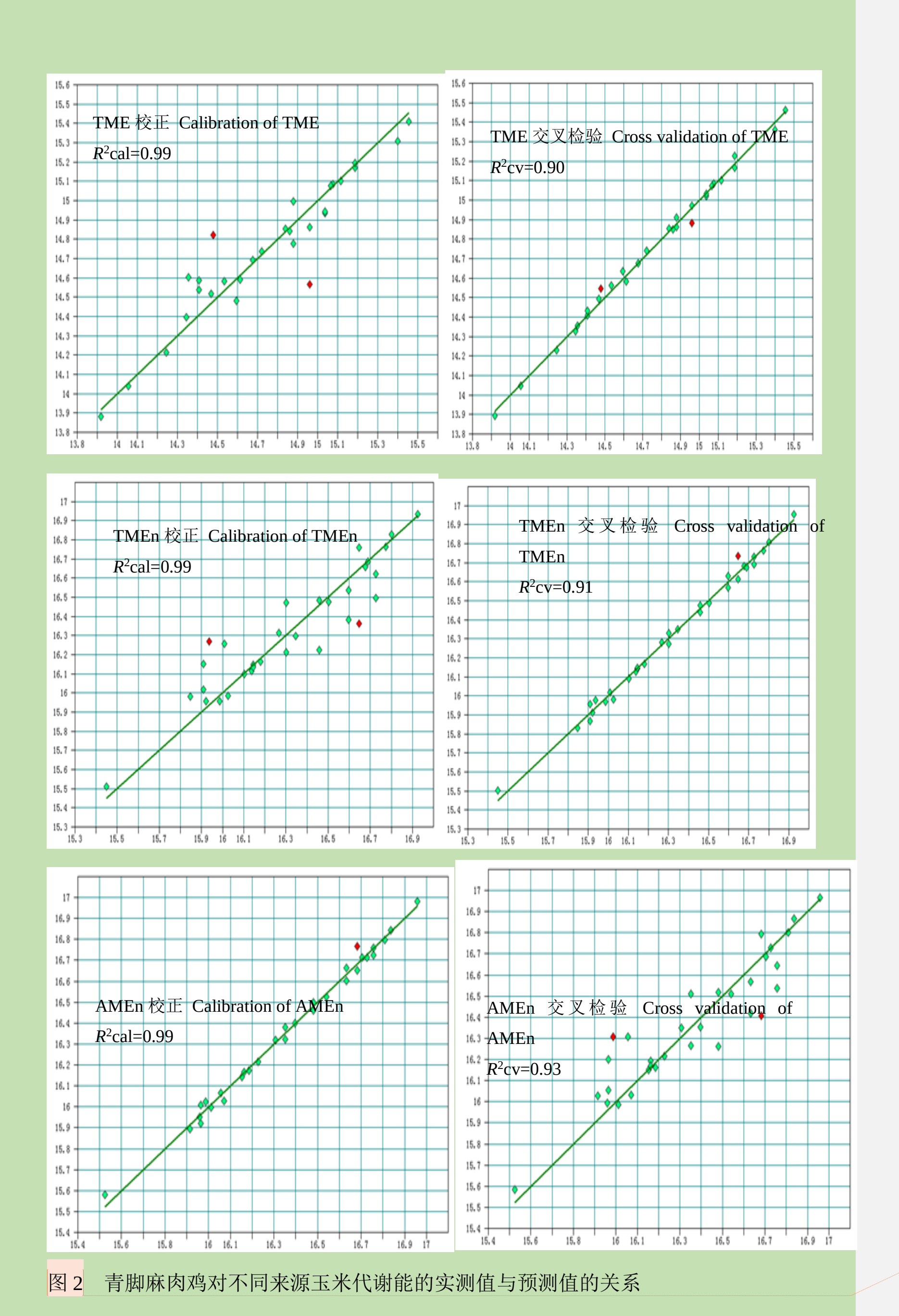


图 2 青脚麻肉鸡对不同来源玉米代谢能的实测值与预测值的关系

Fig.2 Relationship between measured value and predicted value of different corns for *Qingjiaoma* broilers

批注 [U2]: 每个小图横坐标"实测值 Measured value/(MJ/kg DM)"，纵坐标"预测值 Predicted value/(MJ/kg DM)"；整数数字后加".0"，如"16"改为"16.0"。

3 讨 论

3.1 不同来源玉米的代谢能

Zhao 等[9]报道中国 427 个普通玉米（除了高油玉米）的营养水平（DM 基础）为：CP 为（10.3±1.1）%（8.5%~13.0%），GE 为（19.13±0.23） MJ/kg（18.65~19.51 MJ/kg），NDF 为（15.0±3.3）%（6.0%~21.8%），ADF 为（4.4±1.1）%（1.8%~6.8%），CF 为（2.7±0.6）%（1.1%~3.7%），AME 为（14.56±0.54） MJ/kg（13.45~16.11 MJ/kg），AMEn 为（14.29±0.54） MJ/kg（13.48 ~15.81 MJ/kg），TME 为（15.67±0.54） MJ/kg（14.55~17.20 MJ/kg），TMEn 为（15.02±0.54） MJ/kg（13.97~16.54 MJ/kg）。

本试验的 30 个玉米的营养水平（DM 基础）为：CP 为（9.21±0.52）%（8.27%~10.58%），GE 为（18.716±0.106）MJ/kg（18.429~18.951 MJ/kg），NDF 为（13.00±2.21）%（10.00%~18.52%），ADF 为（3.23±0.46）%（2.37%~4.36%），CF 为（2.28±0.28）%（1.89%~2.76%）。变化在 Zhao 等[9]报道的 427 个普通玉米（高油玉米除外）的营养水平范围内，说明玉米样品具有较好的代表性。

本试验中，青脚麻肉鸡对 30 个玉米的 AME 为 14.627 MJ/kg，AMEn 为 14.672 MJ/kg，TME 为 16.248 MJ/kg，TMEn 为 16.293 MJ/kg，变异系数分别是 4.48%、4.37%、3.81%和 3.71%，不同来源玉米的 AME、AMEn、TME、TMEn 均存在显著差异，造成这些差异与玉米的化学成分有关。体外研究表明，可以利用总饲粮纤维、ADF、矿物质及可溶性来预测 AMEn[10]。Sarmiento-Franco 等[11]研究发现纤维对代谢能影响很大，其通过延长饲粮在消化道内的停留时间，从而使所测的代谢能值偏高。在代谢能预测模型中，NDF 是第一限制性变量，决定了 AMEn 的 62.6%变异，NDF 对 AMEn 及 GE 的决定系数分别为 0.616 和 0.736，与能量利用呈强负相关[12]。Losada 等[13]研究发现 NDF 浓度是油料籽实或者其副产物能值的最佳化学预测因子，在 AMEn 和 AMEn/GE 的预测模型中的决定系数分别为 0.721 和 0.736。本试验发现，青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 4 种代谢能与 DM 呈正相关。以 DM 为基础，4 种代谢能与 CP、NDF、ADF 和 CF 呈负相关，AME 和 AMEn 与 GE 呈正相关，TME 和 TMEn 与 GE 呈负相关。其中，AME 和 AMEn 与 CF 呈强负相关的趋势，但未达显著水平；TME 和 TMEn 与 CP 呈显著负相关；其余相关性均不强。

本试验所分析的代谢能与纤维的相关性与前人的报道相同，但相关系数低于前人的报道值，可能与试验动物、样品数量有关。不同玉米的 TME 和 TMEn 的差异规律与 AME 和 AMEn 的变化规律不完全相同，可能与不同代谢试验批次的内源能排泄量的影响。本试验中，各代谢批次的内源能排泄量差异不显著，但平均变异系数达 24.9%，第 1 批次的内源能排泄量较大，

可能与刚开始时鸡只不适应、技术尚不熟练有一定关系。

本试验测定青脚麻肉鸡的玉米 AME 均高于中国饲料营养价值表（2012 第 23 版）中玉米 AME，同时高于申攀[5]结果，可能原因与试验选用的鸡品种及所处的生理阶段不同。幼禽肠道发育尚不健全，消化酶分泌量较少，肠道微生物区系尚不平衡[14]，对饲粮中的抗营养因子耐受性较差，导致对饲粮中的某些养分尚不能消化吸收或消化吸收率较低，反映在 AME 上就是数值偏低[15]。Adedokun 等[15]研究发现 5 日龄罗斯 308 肉鸡内源氨基酸排泄量是 15 和 21 日龄的 2 倍。本试验采用的是 18 周龄以上的优质肉鸡，体重达到 4 kg 左右，消化道功能完善，营养物质的利用率较高，从而使得 AME 在能值上偏高。但本试验测定的玉米代谢能平均值低于聂大娃[17]、赵养涛[15]和娄瑞颖[18]的报道，可能原因是肉鸡品种的差异，他们报道中所采用的均是 28 日龄的爱拔益加（AA）肉鸡，生长周期较优质肉鸡短，对饲料利用率高于优质肉鸡。

3.2　近红外模型预测玉米代谢能的可行性

样品的代表性和基础数据的准确性直接影响近红外模型的精确性[19]。从图1可以看出在12000 cm～4 000 cm^{-1}的谱区范围内，30个玉米样品的光谱曲线趋势相同，光谱存在多个吸收峰，在每个波长点的吸收峰不同，说明收集的30个玉米样品各组分的浓度不同。所选玉米的常规成分与前人的报道值相近，说明玉米样品具有较好的代表性。同时，本试验所得的代谢能值较准确，从而为所构建近红外模型的精确性提供了可能。此外，本试验所构建的近红外模型相关参数较好，4种代谢能近红外模型预测值与实测值呈较强的线性相关，说明所构建的近红外模型可以较好地预测玉米的代谢能值。

娄瑞颖[18]利用 NIRS 构建了预测 AA 肉仔鸡玉米代谢能定标模型(55 个样品)，玉米 AME 和 AMEn R^2_{cal} 均在 0.99 以上，验证决定系数（R^2_{val}）均在 0.81 以上，认为研究所建立的定标模型可用于预测玉米代谢能。魏良明等[20]以 85 个玉米样品建立校正模型，43 个样品进行验证集检验，R^2_{cal} 均大于 0.97，R^2_{cv} 和 R^2_{val} 为 0.92~0.95，RMSEE、RMSECV 和外部验证标准差（RMSEP）均小于 1(0.3~0.7)。本试验中，青脚麻肉鸡的玉米 AME、AMEn、TME 和 TMEn 的 R^2_{cal} 均在 0.99 以上，R^2_{cv} 也在 0.90 以上，表明近红外预测模型能够很好的预测玉米代谢能。但是 TME 和 TMEn 的 R^2_{val} 在 0.80 左右（数值较低，标准差较大，未列出），相比娄瑞颖[18]和魏良明等[20]报道中的相关系数较差，可能与本试验收集的玉米样品数量偏少，代谢能的变异范围较窄，用于内部交叉验证和外部验证集检验的样品数均较少（5 个玉米样品）有关。

4　结　论

① 30 个玉米样品的 DM 为（86.75±0.55）%（85.55%~87.79%），以 DM 为基础，CP 为（9.21±0.52）%（8.27%~10.58%），GE 为（18.716±0.106） MJ/kg（18.429~18.951 MJ/kg），

NDF 为（13.00±2.21）%（10.00%~18.52%），ADF 为（3.23±0.46）%（2.37%~4.36%），CF 为（2.28±0.28）%（1.89%~2.76%）。

② 以 DM 为基础，青脚麻肉鸡对不同来源玉米的 AME 为（14.627±0.655） MJ/kg（11.727~16.225 MJ/kg），AMEn 为（14.672±0.641） MJ/kg（11.793~16.248 MJ/kg），TME 为（16.248±0.619）MJ/kg（13.333~17.727 MJ/kg），TMEn 为（16.293±0.605）MJ/kg（13.398~17.750 MJ/kg）。不同来源玉米的 AME、AMEn、TME 和 TMEn 存在显著差异。

③ 近红外模型可以较好地预测青脚麻肉鸡对玉米的代谢能。

参考文献：

[1] ALVARENGA R R,RODRIGUES P B,ZANGERONIMO M G,et al.Energetic values of feedstuffs for broilers determined with *in vivo* assays and prediction equations[J].Animal Feed Science and Technology,2011,168(3/4):257–266.

[2] DUDLEY-CASH W A.A landmark contribution to poultry science-a bioassay for true metabolizable energy in feedingstuffs[J].Poultry Science,2009,88(4):832–834.

[3] 娄瑞颖,刘国华,张玉萍,等.玉米理化品质及其鸡代谢能的变异研究[J].饲料工业,2011,32(16):34–38.

[4] OWENS B,MCCANN M E,MCCRACKEN K J,et al.Prediction of wheat chemical and physical characteristics and nutritive value by near-infrared reflectance spectroscopy[J].British Poultry Science,2009,50(1):103–122.

[5] 申攀.建立 0-3 周龄黄羽肉鸡玉米净能近红外预测模型以及用常规化学成分建立净能的回归预测模型[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2010.

[6] SIBBALD I R,WOLYNETZ M S.Relationships between estimates of bioavailable energy made with adult cockerels and chicks:effects of feed intake and nitrogen retention[J].Poultry Science,1985,64(1):127–138.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 26437—2010 畜禽饲料有效性与安全性评价 强饲法测定鸡饲料表观代谢能技术规程[S].北京:中国标准出版社,2011.

[8] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3 版.北京：中国农业大学出版社,2007.

[9] ZHAO F,ZHANG H F,HOU S S,et al.Predicting metabolizable energy of normal corn from its chemical composition in adult Pekin ducks[J].Poultry Science,2008,87(8):1603–1608.

[10] CLAUDIO B,DIRCEU L Z,ANTÔNIO L G,et al.Metabolizable energy and amino acids relationships with the soluble fractions of protein and fiber of vegetable feed ingredients[J].Revista Brasileira de Zootecnia,2004,33(6):2274–2282.

[11] SARMIENTO-FRANCO L,MACLEOD M G,MCNAB J M.True metabolisable energy,heat increment and net energy values of two high fibre foodstuffs in cockerels[J].British Poultry Science,2000,41(5):625–629.

[12] LOSADA B,GARCÍA-REBOLLAR P,CACHALDORA P,et al.A comparison of the prediction of apparent metabolisable energy content of starchy grains and cereal by-products for poultry

from its chemical components,*in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy[J].Spanish Journal of Agricultural Research,2009,7(4):813–823.
[13] LOSADA B,GARCÍA-REBOLLAR P,ÁLVAREZ C,et al.The prediction of apparent metabolisable energy content of oil seeds and oil seed by-products for poultry from its chemical components,*in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and Technology,2010,160(1/2):62–72.
[14] 高俊勤,高峰,周光宏.木聚糖酶对肉仔鸡消化道食糜停留时间和营养消化率的影响[J].中国农学通报,2006,22(9):6–9.
[15] 赵养涛.不同玉米肉仔鸡表观代谢能的研究[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2008.
[16] ADEDOKUN S A,PARSONS C M,LILBURN M S,et al. Endogenous amino acid flow in broiler chicks is affected by the age of birds and method of estimation[J].Poultry Science,2007,86(12):2590–2597.
[17] 聂大娃.不同地区玉米肉仔鸡代谢能研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2008.
[18] 娄瑞颖,刘国华,张玉萍,等.近红外光谱技术预测玉米代谢能值定标模型的研究[J].饲料工业,2011,32(20):42–45.
[19] 褚小立,袁洪福,陆婉珍.基础数据准确性对近红外光谱分析结果的影响[J].光谱学与光谱分析,2005,25(6):886–889.
[20] 魏良明,严衍禄,戴景瑞.近红外反射光谱测定玉米完整籽粒蛋白质和淀粉含量的研究[J].中国农业科学,2004,37(5):630–633.

Determination and Prediction of Corn Metabolizable Energy Value for *Qingjiaoma* Broilers

ZHAO Jia DING Xuemei WANG Jianping LUO Yuheng SU Zhuowei BAI Shiping ZENG Qiufeng ZHANG Keying*

（*Key Laboratory of Animal Disease-Resistant Nutrition and Feed Science of Ministry of Agriculture, Institute of Animal Nutrition, Sichuan Agriculture University, Ya'an* 625014, *China*）

Abstract: The study was conducted to evaluate the metabolizable energy values of 30 kinds of corns from different areas in China for *Qingjiaoma* broilers and establish the metabolizable energy predictive models of corn by using the near infrared spectroscopy (NIRS) technology, in order to accumulate the basic data for building feed nutritional value database and fast predicting metabolizable energy of corn for *Qingjiaoma* broilers. A single-factor completely random design

was used in this trial, and a total of 48 30-week-old *Qingjiaoma* broilers with body weight of (4.030±0.392) kg were randomly assigned into several groups for 9 patches of metabolism experiments with 3 or 4 corn samples each and 8 replicates in each sample and 1 broiler in each replicate. An endogenous group was prepared in every metabolism experiment, and 10-day recovery between each batch was set up. Sibbald's empty-force-feeding method was used to investigate the metabolizable energy, including feed withdrawal for 48 h before feeding test samples and then 2% of body weight of corn for force feeding, with 48 h of excreta collection period; whereas the group for endogenous collection was continued to fast and collect the excreta for 48 h. The result showed as follows: 1)The dry matter content in 30 corn samples was (86.75±0.55)%(85.55%~87.79%), and based on the dry matter, contents of crude protein, gross energy, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, crude fiber were (9.21±0.52)% (8.27%~10.58%), (18.716±0.106) MJ/kg (18.429~18.951 MJ/kg), (13.00±2.21)% (10.00%~18.52%), (3.23±0.46)% (2.37%~4.36%) and (2.28±0.28)% (1.89%~2.76%), respectively. 2) Based on the dry matter, apparent metabolizable energy (AME), nitrogen corrected apparent metabolizable energy (AMEn), true metabolizable energy (TME) and nitrogen corrected true metabolizable energy (TMEn) of 30 corns for *Qingjiaoma* broilers were (14.627±0.655) MJ/kg (11.727~16.225 MJ/kg), (14.672±0.641) MJ/kg (11.793~16.248 MJ/kg), (16.248±0.619) MJ/kg (13.333~17.727 MJ/kg) and (16.293±0.605) MJ/kg (13.398~17.750 MJ/kg), respectively. 3) The predictive models of AME, AMEn, TME and TMEn were established with NIRS for *Qingjiaoma* broilers, and the determination coefficients of calibration (R^2_{cal}), the standard deviation of calibration (RMSEE) and relative standard deviation (RSD) of AME, AMEn, TME, TMEn were 0.99, 0.035, 0.24; 0.99, 0.029, 0.20; 0.99, 0.031, 0.19; and 0.99, 0.030, 0.18, respectively. Meanwhile, the determination coefficients of cross validation (R^2_{cv}), the standard deviation of cross validation (RMSECV) and RSD were 0.92, 0.117, 0.80; 0.93, 0.106, 0.73; 0.90, 0.113, 0.70; 0.91, 0.108, 0.66, respectively. These results indicate that: 1) The AME, AMEn, TME and TMEn of different corns were varied for *Qingjiaoma* broilers. 2) It is feasible to predict corn metabolizable energy with NIRS model for *Qingjiaoma* broilers.

Key words: *Qingjiaoma* broilers; corn; metabolizable energy; NIRS

---

*Corresponding author, professor, E-mail: zkeying@sicau.edu.cn (责任编辑 田艳明)